

УДК 532.546

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПАССИВНОГО ПРОБООТБОРНИКА ДЛЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

С.А. Соловьев, Ш.Х. Зарипов

Аннотация

Развита математическая модель и проведены численные исследования коэффициента аспирации аэрозоля в пассивный пробоотборник, установленный на беспилотном летательном аппарате. Пробоотборник представляет собой тонкостенную коническую трубку сквозного сечения, течение в которой обеспечивается давлением набегающего потока. Взвешенные частицы улавливаются фильтром, установленным внутри трубки. В отсутствии влияния частиц на газовый поток несущая среда рассчитывается в приближении потенциального течения несжимаемого газа на основе метода граничных элементов. Уравнения движения частиц рассчитываются в найденном поле скоростей для определения коэффициента аспирации. Исследована зависимость коэффициента аспирации от числа Стокса при различной проницаемости фильтра.

Ключевые слова: аэрозольный пробоотборник, пористый экран, коэффициент аспирации

1. Постановка проблемы

Безопасный мониторинг радиоактивных аэрозолей может быть достигнут при использовании беспилотных летательных аппаратов (БЛА) [1]. В указанной работе разработан аэрозольный пробоотборник конической формы с внутренним фильтром, течение в котором обеспечивается давлением набегающего потока. Пробоотборник работает в диапазоне скоростей БЛА 70-120 км/час. Взвешенные частицы осаждаются на фильтре внутри пробоотборника (рис. 1). Скорость потока воздуха в области фильтра регулируется изменением проницаемости материала. Коническое расширение внутреннего воздушного потока приводит к уменьшению скорости воздуха перед фильтром. В работе [1] изучались радиоактивные аэрозоли с размерами 0,1-1 мкм. Описанный пассивный конический пробоотборник с фильтром можно также использовать для отбора проб грубодисперсных аэрозолей. В этом случае концентрация частиц в невозмущенном потоке и в зоне фильтра может отличаться вследствие проявления их инерционности. В настоящей работе предложена математическая модель аспирации аэрозоля в пассивный конической пробоотборник установленный на БЛА.

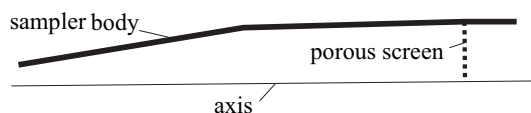


Рис. 1. Схема пробоотборника с пористым экраном

2. Модель обтекания пробоотборника потоком газа

Краевая задача для потенциального потока газа решается численно панельным методом [2] в приближении невязкой осесимметричной модели несжимаемой жидкости. Потенциал скорости потока φ в текущей точке (x, r) запишется как

$$\varphi(x, r) = x - \sum_{i=1}^N \frac{q_i}{4\pi} \int \int \int \frac{dx_i dr_i d\theta}{\sqrt{(x - x_i)^2 + r^2 + r_i^2 + 2rr_i \cos \theta}}, \quad (1)$$

где q_i – интенсивность особенностей (источники/стоки), расположенных на поверхности пробоотборника.

Радиус входного отверстия R_{in} пробоотборника и скорость U_∞ набегающего потока берутся в масштабе координат и скоростей. Вдали от пробоотборника задается единичная скорость. На стенках пробоотборника задаются условия непротекания $u_n = 0$. Удовлетворяя заданные условия на границе, получаем систему линейных алгебраических уравнений для неизвестных значений q_i . Решив полученную систему, компоненты скорости можно определить по формулам: $u_x(x, r) = \partial\varphi(x, r)/\partial x$, $u_r(x, r) = \partial\varphi(x, r)/\partial r$. Фильтр внутри пробоотборника рассматривается как пористый экран. Предполагается, что поток жидкости через фильтр может быть описан законом Дарси. Падение давления p , через фильтр пропорционально скорости газа в фильтре [3]

$$\Delta p = \beta \rho U_\infty U_x, \quad (2)$$

где U_∞ – скорость набегающего потока, U_x – нормальная составляющая скорости фильтрации, ρ – плотность воздуха, β – параметр, который определяет пористые свойства экрана в том числе его проницаемость. Предельные значения $\beta = 0$ и $\beta \rightarrow \infty$ соответствуют полностью проницаемому экрану (пробоотборник без фильтра) и непроницаемому экрану (сплошная стенка).

Используя теорему Бернулли для установившегося движения идеальной жидкости и соотношение (1), для u_x запишем

$$U_x = U_\infty (\sqrt{\beta^2 + 1} - \beta). \quad (3)$$

Компоненты скорости воздушного потока, полученные из численного решения используются для расчета траектории в уравнениях движения частиц. Значения начальных ординат предельных траекторий используются для расчета коэффициента аспирации A . Отношение скоростей $R_a = U_\infty/U_{in}$ в свободном потоке и во входном сечении обычно используется в качестве параметра для тонкостенных аэрозольных пробоотборников в потоке газа. В случае пассивного пробоотборника с фильтром, коэффициент аспирации оценивался с помощью параметров β и $\delta = (R_{ps}/R_{in})^2$, (R_{in} , R_{ps} – радиусы входного сечения пробоотборника и пористого экрана). Используя уравнение сохранения массы

$$U_{in} R_{in}^2 = U_{ps} R_{ps}^2, \quad (4)$$

и (2) запишем соотношение для R_a и β в виде

$$R_a = \frac{1}{\delta(\sqrt{\beta^2 + 1} - \beta)}. \quad (5)$$

Варьируя параметры β и δ мы можем найти значения, которые обеспечат необходимое R_a , включая изокINETический режим. На рисунке 2 приведены картины линий тока газа в носовой области пробоотборника для $\delta = 48.025$ [1] и разных значений β : а) отсутствия пористого экрана ($\beta = 0$); б) режим работы пробоотборника, близкий к изокINETическому ($\beta = 27.5$); в) пористый экран с малой проницаемостью ($\beta = 100$).

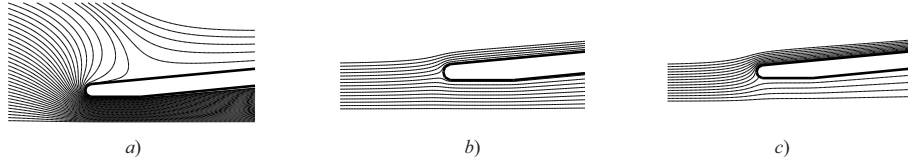


Рис. 2. Линии тока в области носовой части пробоотборника для значений $\delta = 48.025$ и β : а) 0, б) 27.5, в) 100

3. Расчет коэффициента аспирации

В предположении действия закона аэродинамического сопротивления Стокса, безразмерные уравнения движения аэрозольных частиц можно записать следующим образом

$$\frac{dv_x}{dt} = \frac{u_x - v_x}{St}, \quad \frac{dv_r}{dt} = \frac{u_r - v_r}{St}, \quad \frac{dx}{dt} = v_x, \quad \frac{dr}{dt} = v_r, \quad (6)$$

где v_x , v_r и u_x , u_r – безразмерные компоненты скоростей частиц и газовой среды, t – безразмерное время, $St = d_p^2 \rho_p U_\infty / 18\mu(2R_{in})$ – число Стокса, d_p и ρ_p – диаметр и плотность частицы, μ – вязкость воздуха. Решая задачу Коши для (6) с начальными условиями при $t = 0$: $v_x = 1$, $v_r = 0$, $x = x_0$, $r = r_0$ мы можем определить траектории частиц. В невозмущенном потоке вдали от пробоотборника частицы движутся по направлению оси x . Пусть S_p – площадь поперечного сечения, ограниченного предельной траекторией частиц вдали от пробоотборника. Предельная траектория частиц делит поток аэрозоля на две части: аспирируемые и проходящие мимо пробоотборника. Зная площадь S_p и расход воздуха через входное отверстие пробоотборника $Q = U_s \pi R_{in}^2$, коэффициент аспирации можно рассчитать по формуле

$$A = \frac{U_1 S_p}{Q} = \frac{\pi R_{p0}^2 U_\infty}{\pi R_{in}^2 U_s} = R_a R_{p0}^2, \quad (7)$$

где R_{p0} – начальная ордината предельной траектории.

Сравнение зависимостей $A(St)$ для различных R_a и δ приведено на рис. 2.

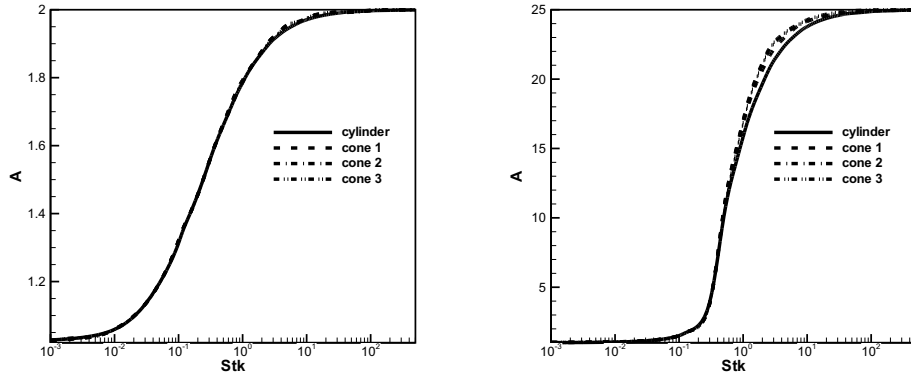


Рис. 3. $A(St)$ для значений $R_a = 2$, $R_a = 25$ и δ : 1 – $\delta = 1$, 2 – $\delta = 3.323$, 3 – $\delta = 4.207$, 4 – $\delta = 48.025$

При небольшой скорости аспирации ($R_a = 2$) кривые $A(St)$ практически совпадают для цилиндрического и конических пробоотборников с разным углом раствора конуса. При достаточно больших значениях скорости аспирации ($R_a = 25$)

наблюдаются отличия в работе между цилиндрическим и коническими пробоотборниками в диапазоне инерционных частиц. При этом отличия коэффициента аспирации для разных углов раствора конуса незначительны.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты N 12–01–00333, 14-01-31118).

Summary

S.A. Solov'ev, Sh.Kh. Zaripov. Mathematical model of aerosol sampler for an unmanned aerial vehicle.

A mathematical model and numerical calculations of the coefficient of aerosol aspiration into a passive sampler mounted on unmanned aerial vehicles are realized. The sampler is a thin-walled conical tube with interior flow which is provided by the pressure of the incoming flow. Suspended particles are trapped by the filter set inside the tube. In the absence of the effect of particles influence on the gas flow the carrier medium is calculated in the approximation of an incompressible potential flow by the boundary element method. The equations of motion of the particles is calculated in the velocity field results to determine the coefficient of aspiration. The coefficient of the aspiration depending on the Stokes number is studied.

Key words: aerosol sampler, porous screen, aspiration coefficient

Литература

1. *Perajarvi K., Lihtinen J., Pollanen R., Toivonen H.* Design of an air sampler for a small unmanned aerial vehicle // *Radiation Protection Dosimetry*. – 2008. – No 123. – P. 328-333.
2. *Fletcher C.A.J.* Computational Techniques for Fluid Dynamics. – Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1990. – 445 p.
3. *O'Neill F.G.* Source models of flow through and around screens and gauzes // *Ocean Engineering*. – 2006. – No 33. – P. 1884–1895.

Соловьев Сергей Анатольевич – к.ф.-м.н., инженер-проектировщик, Казанский (Приволжский) федеральный университет
E-mail: *serguei_s349@mail.ru*

Зарипов Шамиль Хузеевич – д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой, Казанский (Приволжский) федеральный университет
E-mail: *Shamil.Zaripov@kpfu.ru*